

УДК 626.8

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-138-154

А. И. Тищенко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ УСИЛИЯ ВОДНОГО ПОТОКА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ОБРАЗОВАНИЮ МЕСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РУСЛАХ МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ

Цель: определение предельного значения усилия водного потока, способствующего образованию местных деформаций в руслах мелиоративных каналов, на основе теоретических зависимостей в плоском движении системы материальных точек. **Материалы и методы.** Вопросам местных деформаций в земляных руслах каналов посвящены работы отечественных и зарубежных авторов. В их число входят работы И. И. Леви, М. С. Вызго, Ц. Е. Мирцхулавы, А. Ф. Дмитриева, С. М. Васильева и др. В этих работах и большинстве работ других авторов основное внимание уделено одному параметру – глубине воронки размыва, в то время как ее горизонтальные составляющие (длина и ширина) имеют не меньшую актуальность для их исследования и получения расчетных зависимостей. В качестве материалов использованы данные натуральных исследований каналов Ставропольского и Краснодарского краев. Методы заключались в сравнении результатов натуральных исследований с расчетными данными по рекомендациям, предложенным в работах некоторых авторов, и выводе формулы лобового давления на частицу грунта путем преобразования теоретической зависимости основного закона механики. **Результаты.** Результаты сравнения глубин размыва, полученных по расчетным формулам, с данными натуральных исследований показали, что расчетные глубины отличаются как друг от друга, так и от натуральных данных. Использование теоремы импульсов из классической механики дало возможность теоретического подхода к прогнозированию силового воздействия на образование местных деформаций на мелиоративных каналах. С помощью этой теоремы получена зависимость для определения лобового давления струи на несвязный грунт канала. По материалам натуральных исследований получена зависимость для определения длины деформации русла канала. **Выводы.** Сравнение длин размыва, рассчитанных по формуле, с натуральными данными показало удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: местные деформации; мелиоративные каналы; натуральные исследования; основной закон механики; безразмерные параметры; теорема импульсов.

A. I. Tishchenko

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

DETERMINING THE LIMIT VALUE OF THE WATER FLOW FORCE CONTRIBUTING TO THE FORMATION OF LOCAL DEFORMATIONS IN RECLAMATION CHANNEL BEDS

Purpose: determining the limiting value of the water flow force, which contributes to the formation of local deformations in the reclamation channels beds, based on theoretical dependences in the planar motion of the system of mass points. **Materials and methods.**



The papers of domestic and foreign authors are devoted to issues of local deformations in the earth channels. These include the works of I. I. Levy, M. S. Vyzgo, C. E. Mirtskhulava, A. F. Dmitriev, S. M. Vasilyev and others. In these works and most of the works of other authors, the main focus is on one parameter – the depth of the erosion funnel, while its horizontal components (length and width) are no less relevant for their study and obtaining the calculated dependencies. The materials used are data from field studies of canals of Stavropol and Krasnodar territories. The methods consisted in comparing the results of field studies with the calculated data according to the recommendations proposed in the works of some authors, and deriving the frontal pressure formula on a soil particle by converting the theoretical dependence of the basic law of mechanics. **Results.** The results of comparing the erosion depths obtained by the calculation formulas with the data of field studies showed that the calculated depths differ both from each other and from field data. Applying the theorem of momentum from classical mechanics made it possible to have a theoretical approach to predicting the force effect on the formation of local deformations in reclamation channels. Using this theorem a dependence for determining the frontal pressure of a jet on an incoherent channel ground is obtained. Based on the materials of field studies, a dependence is obtained for determining the length of the deformation of the channel of the channel. **Conclusions.** A comparison of the erosion lengths calculated by the formula with field data showed satisfactory results.

Key words: local deformations; reclamation channels; field study; basic law of mechanics; dimensionless parameters; theorem of momentum.

Введение. Местные деформации представляют собой размывы земляного русла мелиоративного канала в нижнем бьефе гидротехнического сооружения. Последствиями этих размывов являются: разрушение рисбермы, состоящей из каменной наброски; подмыв и сползание железобетонных плит жесткого крепления в нижнем бьефе; подмыв водобойной части сооружения. Результат – разрушение гидротехнического сооружения.

Вопросам местных деформаций в земляных руслах каналов посвящены работы отечественных и зарубежных авторов, в числе которых труды И. И. Леви, М. С. Вызго, Ц. Е. Мирцхулавы, А. Ф. Дмитриева, С. М. Васильева и др. [1–12]. В них основное внимание уделено одному параметру – глубине воронки размыва, в то время как ее горизонтальные составляющие (длина и ширина) имеют не меньшую актуальность для их исследования и получения расчетных зависимостей.

За период XX в. накоплен значительный материал по местным деформациям на основе натурных и лабораторных исследований. Однако далеко не все существующие методы расчета приводят к результатам, согласующимся с натурными наблюдениями и между собой. Причина такого

несогласования заключается в том, что трудно учесть основные факторы, влияющие на размыв, для различных регионов страны в целом. Каждая расчетная зависимость и входящие в нее параметры и коэффициенты предусматривают условия взаимодействия потока, русла и конструкции сооружений для определенных условий и районов.

Материалы и методы. В качестве материалов использованы данные натуральных исследований каналов Ставропольского и Краснодарского краев. Методы заключались в сравнении результатов натуральных исследований с расчетными данными по рекомендациям, предложенным в работах некоторых авторов, и выводе новой формулы путем преобразования теоретической зависимости основного закона механики [13, 14].

Результаты и обсуждение. По полученным данным натуральных исследований местных деформаций на 25 участках нижних бьефов каналов мелиоративных систем нами произведены подсчеты глубин размыва по формулам М. С. Вызго, А. Ф. Дмитриева, Ш. А. Бабаджановой и выполнено сравнение расчетных глубин с данными натуральных исследований (таблица 1). Приведенные расчеты показали, что очень мало результатов с отклонением от фактического значения меньше 10 %. Причиной такой несходимости является структура рекомендованных формул.

Таблица 1 – Сравнение фактических глубин размыва $T_{\text{факт}}$ с расчетными глубинами T_p по формулам М. С. Вызго, А. Ф. Дмитриева, Ш. А. Бабаджановой

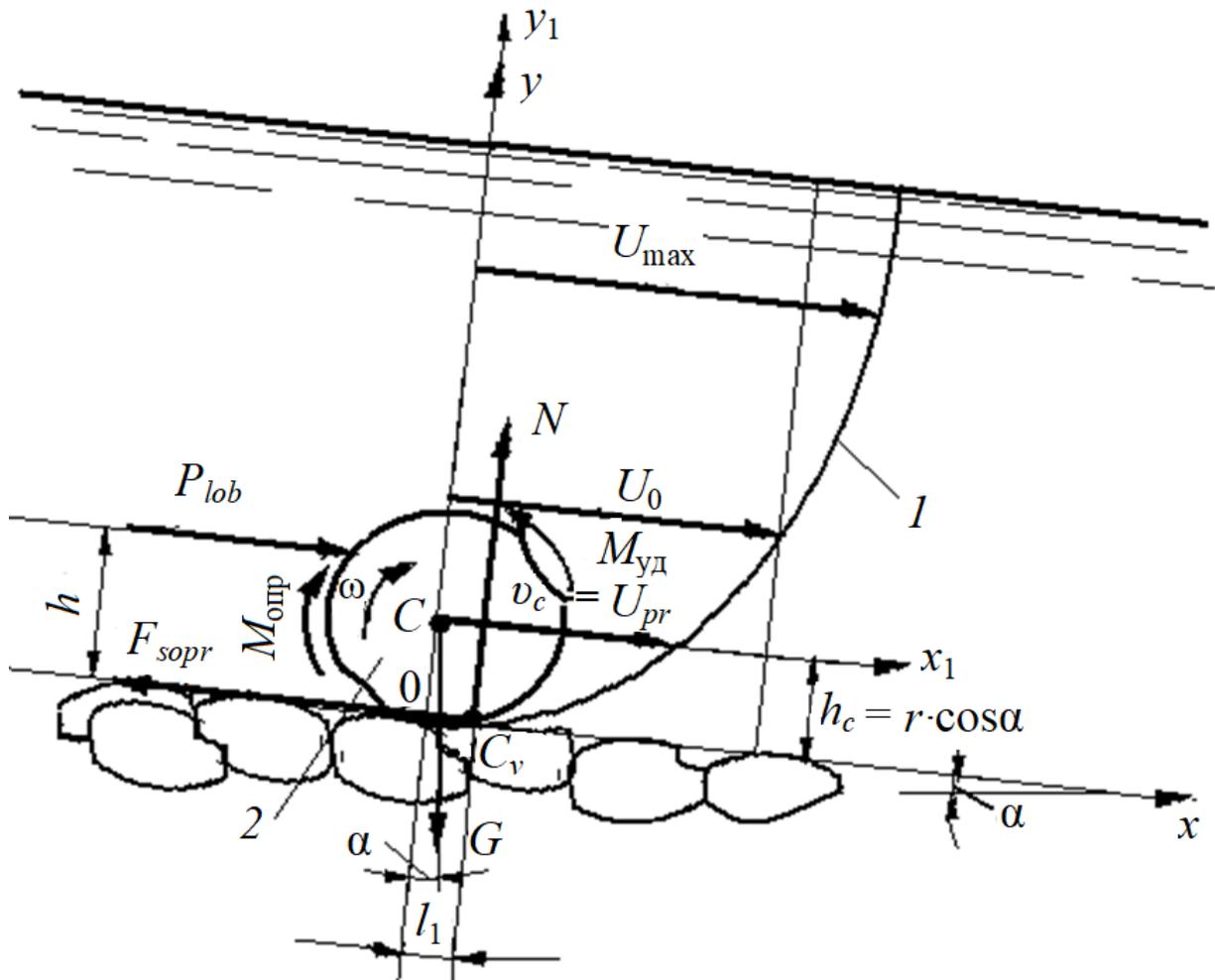
Наименование сооружения и канала	Фактическая глубина размыва $T_{\text{факт}}$, м	Расчетная глубина размыва и % отклонения от фактической					
		М. С. Вызго		А. Ф. Дмитриев		Ш. А. Бабаджанова	
		T_p , м	%	T_p , м	%	T_p , м	%
1	2	3	4	5	6	7	8
Шлюз-регулятор 0 на БСК	2,6	2,3	11,5	1,4	46,0	2,8	7,7
Шлюз-регулятор 4 на БСК	0,8	0,5	37,5	0,1	87,0	1,0	25,0
Сброс в р. Калаус на БСК	4,5	0,8	82,0	2,6	42,0	2,6	42,0
ПК 0 распределителя «Широкий»	2,3	1,4	39,1	1,6	30,4	2,0	13,0
ПК 1 + 16 канала Р-2	1,3	0,8	34,7	0,9	30,7	0,5	62,0
ПК 60 канала Р-2	0,6	0,7	16,7	0,4	33,0	0,3	50,0
ПК 55 + 16 канала Р-2	0,8	0,7	12,5	0,6	25,0	0,2	75,0

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ПК 0 канала Левобережного	1,9	1,2	36,8	0,5	73,7	0,6	68,4
ПК 38 + 60 канала Левобережного	1,9	0,4	78,9	0,9	52,6	0,9	52,6
ПК 119 канала «Теплушка»	0,5	0,6	16,7	0,3	40,0	0,3	40,0
ПК 113 канала «Теплушка»	0,3	0,5	40,0	0,4	25,0	0,2	33,0
ПК 87 канала «Теплушка»	0,4	0,6	33,0	0,4	0,0	0,2	50,0
ПК 74 канала «Теплушка»	0,3	5,6	94,6	0,2	33,0	0,2	33,0
Перепад на канале «Теплушка»	0,3	7,1	96,0	0,4	25,0	0,2	33,0
ПК 6 + 55 канала Р-9	0,6	0,7	14,3	1,1	45,4	0,3	50,0
ПК 26 + 59 канала Р-9	0,5	0,7	29,6	1,3	62,0	0,1	80,0
ПК 33 + 58 канала Р-9	0,6	0,7	14,3	1,3	54,0	0,2	66,6
ПК 61 + 78 канала Р-9	0,4	0,6	33,3	2,4	83,0	0,1	75,0
ПК 45 канала Р-2	1,2	1,3	7,7	1,8	33,3	0,7	41,7
МХ Р-2-9 Кубанская рисовая система	0,3	1,1	72,7	1,1	72,7	0,5	40,0
МХ Р-2-10 Кубанская рисовая система	1,4	1,0	28,6	0,3	78,6	1,1	21,4
Канал питания	1,3	1,1	15,4	0,6	53,8	1,1	15,4
Канал Р-2-10-11	0,8	0,9	11,0	0,9	11,0	1,0	20,0
Оросительный канал ОМ2-3	0,4	0,3	25,0	0,1	75,0	0,2	50,0
Канал Р-1	0,6	0,5	16,6	0,1	33,3	0,2	66,7

Каждая формула имеет свои особо важные параметры. Одни формулы первостепенное значение отдают скорости потока, другие ставят на первое место грунты, слагающие русло, третьи учитывают и свойства моделируемых грунтов, и гидравлические характеристики потока. В основном предложенные зависимости имеют эмпирический характер, так как они получены по результатам обработки материалов экспериментальных исследований. На наш взгляд, с целью вывода зависимости для определения местных деформаций земляного русла мелиоративных каналов следует учесть теоретические зависимости классической механики [13, 14].

При сходе с плиты водобоя (в каналах младшего порядка) или с жесткого крепления рисбермы струи воды стараются заполнить поры между частицами грунта, слагающего русло канала. Верхний слой грунта, соприкасающийся с движущейся жидкостью, находится в насыщенном состоянии. Схема воздействия потока на частицу грунта приведена на рисунке 1.



1 – эпюра скоростей потока на вертикали; 2 – частица грунта дна канала; U_{\max} , U_0 , U_{pr} – соответственно максимальная, средняя и придонная скорости потока, м/с; G – вес частицы грунта, кН; P_{lob} – лобовое усилие на частицу грунта от давления воды, кН; N – нормальная реакция, кН; F_{sopr} – сила сопротивления от сцепления частиц грунта, кН; h – плечо силы P_{lob} , м; l_1 – плечо силы G относительно точки опоры C_v (мгновенного центра скоростей), м; C – центр масс системы частиц (грунт + вода); ω – угловая скорость при вращении частицы грунта вокруг мгновенного центра скоростей, c^{-1} ; α – угол наклона дна водотока к горизонтальной линии (уклон дна канала $i = \tan \alpha$), рад; $v_c = U_{pr}$ – скорость центра масс, равная придонной скорости, м/с; $h_c = r \cdot \cos \alpha$ – плечо центра масс относительно мгновенного центра вращения C_v , м; $M_{опр}$ – опрокидывающий момент, кН·м; $M_{уд}$ – удерживающий момент, кН·м; $f_k = l_1$ – коэффициент трения качения, м

Рисунок 1 – Схема действия струи потока на частицу грунта

Грунт, находящийся в насыщенном состоянии, частично теряет сцепление между частицами. По внешней поверхности частицы грунта, соприкасающейся с придонным слоем жидкости, создаются касательные на-

пряжения, стремящиеся ее опрокинуть, относительно точки C_y . В то же время струя воды (с усилием P_{lob}) стремится сдвинуть частицу грунта в горизонтальном направлении.

При рассмотрении взаимодействия частиц грунта и воды принимаем их твердыми материальными точками (вода с физической точки зрения считается несжимаемой [13, 14]). Частица воды, обладающая массой m_1 и скоростью U_{pr} , достигнув частицы грунта массой m_2 , находящейся в состоянии предельного равновесия, сообщит ей толчок (импульс S), после которого частица грунта приобретет движение со скоростью v_C . Математически это явление можно представить следующим образом:

$$v_C = (U_{pr} - v_n),$$

где v_C – придонная скорость движения частиц (грунт + вода) после их столкновения, м/с;

U_{pr} – придонная скорость движения частицы воды до столкновения с частицей грунта, м/с;

v_n – допускаемая (неразмывающая) скорость для грунта, слагающего русло канала, м/с.

В связи с тем, что вода обладает кинематической вязкостью, а грунт шероховатостью, удар между частицами произойдет неупругий. Вследствие этого система частиц (грунт + вода) будет двигаться со скоростью v_C с общей массой $m = m_1 + m_2$.

С целью нахождения теоретической зависимости для определения допускаемых местных деформаций отводящего русла применим дифференциальные уравнения плоскопараллельного (плоского) движения. Согласно схеме (рисунок 1) центр масс (C) системы точек совершает поступательное движение – параллельно оси Ox . Освободив систему (грунт + вода) от внешних связей, заменив их реакциями, рассмотрим поступательно-вращательное движение этой системы в относительном движении координатных осей x_1Cy_1 .

Приняв форму общей частицы в виде шара, составим дифференциальные уравнения плоского движения:

$$m \frac{d^2 x_C}{dt^2} = \sum X_i^E = P_{lob} + G \sin \alpha - F_{sopr}, \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 y_C}{dt^2} = \sum Y_i^E = N - G \cos \alpha, \quad (2)$$

$$J_C \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum M_{i,C}^E = N l_1 - F_{sopr} h_C - P_{lob} (h - h_C), \quad (3)$$

где $\frac{d^2 x_C}{dt^2}$, $\frac{d^2 y_C}{dt^2}$ – ускорения движения центра масс системы в дифференциальной форме относительно координатных осей Ox и Oy , m/c^2 ;

X_i^E , Y_i^E – внешние силы, действующие на систему материальных точек, в проекциях на координатные оси Ox и Oy , кН;

P_{lob} , G , N , F_{sopr} – силы, расшифровка которых приведена в пояснениях к рисунку 1;

J_C – момент инерции шара при его вращении вокруг оси, проходящей через точку C перпендикулярно плоскости $x_1 C y_1$, $кН \cdot м^2$;

$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \varepsilon$ – угловое ускорение вращения плоской системы сил вокруг оси, проходящей через точку C перпендикулярно плоскости $x_1 C y_1$, $с^{-2}$;

$M_{i,C}^E$ – главный момент всех внешних сил, действующих на материальную систему, относительно точки C , $кН \cdot м$;

l_1 и $h - h_C$ – плечи сил N , P_{lob} и F_{sopr} , создающие удерживающий и опрокидывающий моменты внешних сил относительно точки C , м;

$l_1 = f_k = r \cdot \sin \alpha$ – плечо силы G , являющееся коэффициентом трения качения f_k , м.

Вследствие того, что координата Oy_C постоянна при движении сис-

темы материальных точек, ускорение $\frac{d^2 y_C}{dt^2} = 0$, и тогда из уравнения (2)

находим реакцию нормального давления N :

$$N - G \cos \alpha = 0,$$

откуда

$$N = G \cos \alpha.$$

В дифференциальных уравнениях (1) и (3) содержатся три неизвестных величины: $\frac{d^2 x_C}{dt^2}$, F_{sopr} и $\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \varepsilon$. Относительная система координат $x_1 y_1$ с центром масс C движется поступательно, а все остальные точки совершают вращательное движение вокруг центра вращения C с угловой скоростью ω . Выразим скорость центра масс v_C следующей зависимостью:

$$v_C = |\omega| r, \quad (4)$$

где $|\omega|$ – абсолютное значение угловой скорости, c^{-1} .

В проекции на ось Ox запишем дифференциальную форму выражения (4) в следующем виде:

$$\frac{dx_C}{dt} = v_C = |\omega| r.$$

Так как вращение точек системы вокруг центра вращения C происходит по часовой стрелке, то алгебраическая величина угловой скорости будет иметь отрицательное значение, т. е.

$$\frac{d\varphi}{dt} = -|\omega|.$$

В результате формула (4) примет следующий вид:

$$\frac{dx_C}{dt} = v_C = -\frac{d\varphi}{dt} r. \quad (5)$$

Продифференцировав выражение (5) по времени, получим дополнительное уравнение к предыдущим трем (1)–(3) в следующей форме:

$$\frac{d^2 x_C}{dt^2} = -\frac{d^2 \varphi}{dt^2} r,$$

или в алгебраической форме:

$$a_{Cx} = -\varepsilon r, \quad (6)$$

где a_{Cx} – ускорение центра масс системы в проекции на ось Ox .

Из формулы (6) находим угловое ускорение ε , c^{-2} , в дифференциальной форме:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{1}{r} \frac{d^2 x_C}{dt^2}. \quad (7)$$

Момент инерции шара относительно оси, проходящей через центр масс системы материальных точек, имеет вид $J_C = \frac{2}{5} mr^2$, $\text{кН}\cdot\text{м}^2$ [13, 14].

Подставив равенство (7) и значение J_C в уравнение (3), получим:

$$\frac{2}{5} mr^2 \left(-\frac{1}{r} \frac{d^2 x_C}{dt^2} \right) = Nl_1 - F_{sopr} h_C - P_{lob} (h - h_C), \quad (8)$$

где $F_{sopr} = fN = fG \cos \alpha$;

f – коэффициент трения скольжения.

Для определения плеча h (точки приложения лобового давления) воспользуемся рекомендациями Ц. Е. Мирцхулавы [3], В. Н. Гончарова [15] и А. И. Богомолова [16], согласно которым при распределении скоростей на вертикали по закону параболы $h = 0,7d = 1,4r$.

Подставив F_{sopr} и характеристики плеч в уравнение (8), получим:

$$\frac{2}{5} mr^2 \left(-\frac{1}{r} \frac{d^2 x_C}{dt^2} \right) = G \cos \alpha \cdot r \sin \alpha - fG r \cos \alpha - P_{lob} 0,4r. \quad (9)$$

Проведя математические действия с заменой массы m весом G в уравнении (9), выразим из этого уравнения дифференциальную форму ускорения в следующем виде:

$$\frac{d\upsilon_C}{dt} = \frac{P_{lob}g}{G} + 2,5fg \cos \alpha - 2,5g \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \quad (10)$$

где g – ускорение сил тяжести, м/с^2 .

Проинтегрировав выражение (10) в соответствующих пределах, получим:

$$\upsilon_C = \left[\frac{P_{lob}}{G} + 2,5 \cos \alpha (f - \sin \alpha) \right] gt. \quad (11)$$

Запишем дифференциальное уравнение вращательного движения вокруг мгновенного центра вращения C_v :

$$J_{C_v} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \sum M_{i,C_v}^E = Gl_1 - P_{lob}h, \quad (12)$$

где $J_{C_v} = J_C + mr^2$ – момент инерции относительно оси, проходящей через мгновенный центр вращения системы, $\text{кН}\cdot\text{м}^2$.

Запишем момент инерции шара относительно оси C_v :

$$J_{C_v} = J_C + mr^2 = \frac{2}{5}mr^2 + mr^2 = \frac{7}{5}mr^2. \quad (13)$$

Подставив значения (13) в уравнение (12), получим:

$$\frac{7}{5}mr^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} = Gr \sin \alpha - P_{lob}1,4r. \quad (14)$$

Вследствие этого уравнение (14) примет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{5}{7} \frac{g \sin \alpha}{r} - \frac{gP_{lob}}{Gr}. \quad (15)$$

Разделив переменные в выражении (15) и проинтегрировав в соответствующих пределах, найдем зависимость угловой скорости от времени:

$$\omega = \omega_{C_v} = \left(\frac{5 \sin \alpha}{7r} - \frac{P_{lob}}{Gr} \right) gt.$$

Выражаем это уравнение через скорость центра масс:

$$\upsilon_C = \omega \cdot r = \left(\frac{5}{7} \sin \alpha - \frac{P_{lob}}{G} \right) gt. \quad (16)$$

После совместного решения уравнений (11) и (16) получим:

$$P_{lob} = 1,25Gf - 0,89G \sin \alpha = G(1,25f - 0,89 \sin \alpha). \quad (17)$$

Выразим вес G через массу частицы (грунт + вода), находящейся во взвешенном состоянии:

$$G = mg = m_2g - m_1g. \quad (18)$$

Из литературных источников по гидравлике масса любого тела определяется по следующей зависимости:

$$m = \rho V, \quad (19)$$

где ρ – плотность тела, кг/м³;

V – объем тела, м³.

Подставим зависимость (19) в формулу (18):

$$G = \rho Vg = Vg - Vg = Vg(\rho_2 - \rho_1), \quad (20)$$

где ρ_2 – плотность грунта, кг/м³;

ρ_1 – плотность воды, кг/м³.

Объем шара определяется перемножением трех измерений и равен:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3. \quad (21)$$

Подставив формулу (21) в выражение (20), а затем в равенство (17), получим зависимость для определения предельного лобового давления на сдвиг частички несвязного грунта (шарообразной формы) с учетом его радиуса в следующем виде:

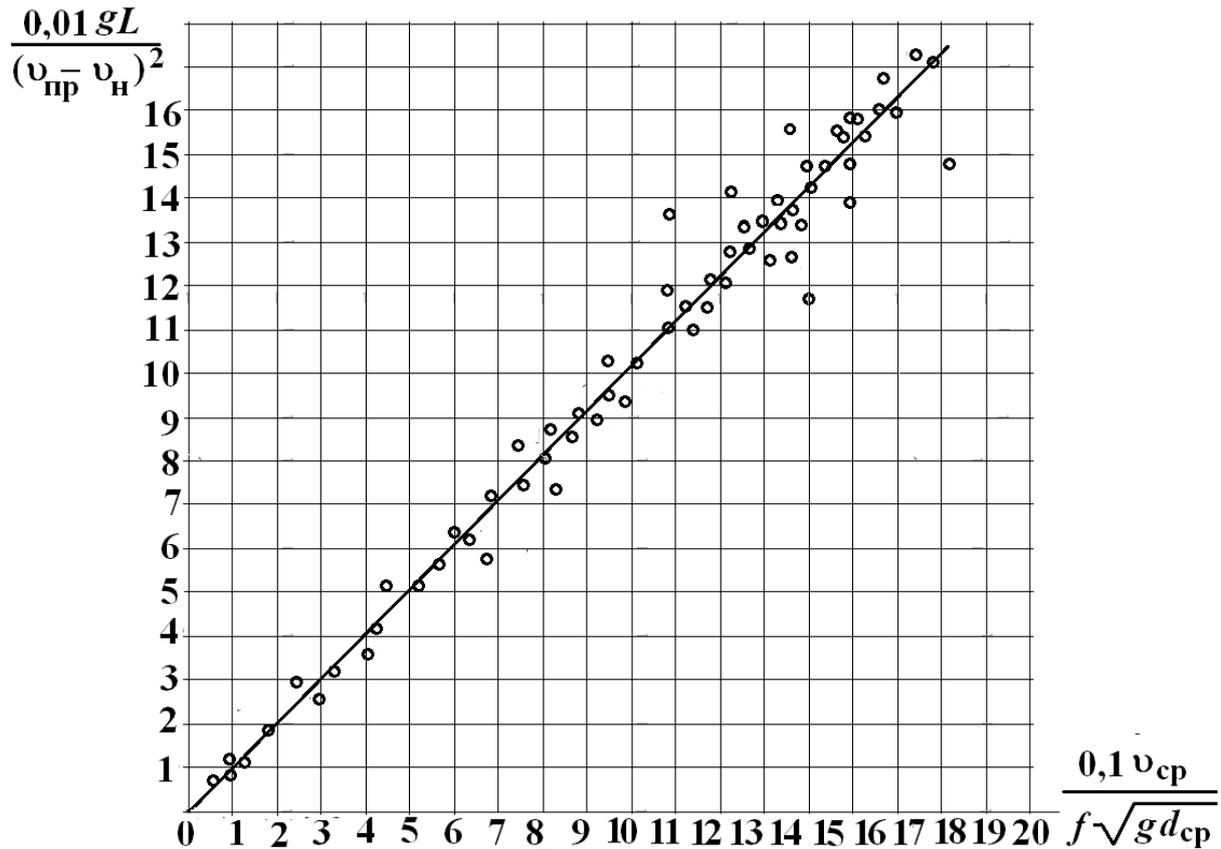
$$P_{lob} = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_2 - \rho_1) (1,25f - 0,89 \sin \alpha). \quad (22)$$

С помощью полученной зависимости (22) с учетом скоростного напора можно определить глубину деформации русла по известной скорости потока в любом поперечном сечении по длине канала.

По определению длины местных деформаций русла имеется незначительное количество работ. Основными из них являются труды И. И. Леви [1], В. Н. Гончарова [15] и других авторов, посвятивших свои исследо-

вания обеспечению надежности мелиоративных каналов без образования местных деформаций в земляных руслах. К ним относятся труды В. Н. Щедрина [17, 18], С. М. Васильева [19] и др.

На рисунке 2 представлен график зависимости длины местного размыва от ряда факторов, которые с помощью теорий размерности и подобия были приведены к безразмерным параметрам для построения графика.



$v_{\text{ср}}$ – средняя скорость в живом сечении потока, м/с; $v_{\text{пр}}$ – придонная скорость в конце жесткого крепления, м/с; v_H – допустимая неразмывающая скорость для грунта канала, м/с

Рисунок 2 – График зависимости $L_{\text{разм}} = \Phi(v_{\text{ср}}, v_{\text{пр}}, v_H, f, g, d_{\text{ср}})$

С помощью метода наименьших квадратов нами получена следующая зависимость:

$$L_{\text{разм}} = \frac{10 v_{\text{ср}} (v_{\text{пр}} - v_H)^2}{f \sqrt{g^3 d_{\text{ср}}}}, \quad (23)$$

где $L_{\text{разм}}$ – длина местного размыва, м;

U_{cp} , U_{np} , U_H – расшифровка приведена в подрисуночной подписи;

f – коэффициент трения мокрого грунта по грунту, безразмерный;

d_{cp} – средний диаметр частиц грунта, определяемый по гранулометрической кривой состава, м.

В таблице 2 приведено сравнение расчетных длин местного размыва (по формулам В. Н. Гончарова, И. И. Леви, Н. Н. Беляшевского и по формуле (23)) с натурными данными.

Таблица 2 – Сравнение длин местного размыва по натурным и расчетным данным

Название сооружения	Длина местного размыва, м								
	фак- тиче- ская	по рекомендуемым зависимостям							
		В. Н. Гонча- рова		И. И. Леви		Н. Н. Беля- шевского		по форму- ле (23)	
		L_p	%	L_p	%	L_p	%	L_p	%
Регулятор «нулевой» на БСК	35	32	8,6	60	71,4	24	31,4	40	14,3
Иркутская ГЭС [20]:									
- по оси	300	44	-85,3	92	-69,3	44	-85,3	297	1,0
- у правого берега	400	53	-86,8	92	-77,0	52	-87,0	418	4,5
Красноярская ГЭС [21]	200	170	15,0	207	3,5	148	26,0	207	3,5
Распределитель Широкий из БСК	20	15	25,0	27	35,0	15	25,0	24	20,0
Водозабор в Левобережный канал из БСК	8	9	12,5	18	-125,0	7	12,5	10	-25,0
Пролетарский канал. Головное сооружение	15	12	20,0	49	226,7	12	20,0	15	0,0
Плотина Лебринг (Австрия) [22]	28	16	42,9	52	85,7	24	14,3	28	0,0
Газалкентская плотина на р. Чирчик [2]	58	20	65,5	40	31,0	50	13,8	58	0,0
Фархадская плотина [2]	56	62	10,7	81	44,6	86	53,6	50	10,7
Плотина Ринкоп дель Бонет [2]	35	35	0,0	122	-248,6	45	28,6	28	20,0

Из данных таблицы 2 видно, что зависимости В. Н. Гончарова и Н. Н. Беляшевского в основном дают заниженные результаты, формула И. И. Леви дает завышенные результаты, зависимость (23) дает удовлетворительные результаты с процентом расхождения не выше 25 %.

В связи с тем, что участок размыва должен быть закреплен, но не

на всей длине [2], длину жесткого крепления ориентировочно можно принять равной 2/3 от расчетной длины, а именно:

$$L_{\text{кр}} = \frac{2}{3} L_{\text{разм}} = \frac{6,6V_{\text{ср}}(V_{\text{kk}} - V_{\text{H}})^2}{f\sqrt{g^3 d_{\text{ср}}}}. \quad (24)$$

Выводы

1 С помощью основного закона классической механики в дифференциальной форме плоского движения системы материальных точек получена расчетная теоретическая зависимость (22), которая позволяет определить предельное лобовое давление на сдвиг частички несвязного грунта (шарообразной формы) с учетом величины ее радиуса.

2 По материалам натуральных и лабораторных исследований получена эмпирическая зависимость (23), проверка применимости которой к расчету местных деформаций каналов в земляных руслах выполнена в табличной форме (таблица 2), подтверждены удовлетворительные результаты расчета величин в сравнении с фактическими данными по различным сооружениям.

3 Предлагаемая зависимость (24) позволяет назначить рациональную длину жесткого крепления в отводящем русле канала с учетом недопущения в нем возникновения местных деформаций и обеспечения надежной устойчивости русел каналов в эксплуатационный период.

4 Сведения таблицы 2 показали, что размеры сооружения (крупные на реках или небольшие на каналах) не влияют на образование и параметры местных деформаций. К основным факторам в этом явлении относятся физико-механические свойства грунтов и силовые воздействия от динамических характеристик водного потока.

Список использованных источников

1 Леви, И. И. О местном размыве за сооружениями / И. И. Леви // Гидротехническое строительство. – 1956. – № 1. – С. 42–56.

2 Вызго, М. С. Эксплуатационные мероприятия, прогнозы и способы уменьшения местных размывов за гидротехническими сооружениями / М. С. Вызго. – Ташкент, 1966. – 292 с.

3 Мирцхулава, Ц. Е. Современные исследования в области местных размывов

русел за гидротехническими сооружениями / Ц. Е. Мирцхулава, А. М. Мухаммедов // Гидротехническое строительство. – 1968. – № 12. – С. 22–35.

4 Дмитриев, А. Ф. Определение глубины воронки размыва в нижнем бьефе лесосплавных плотин / А. Ф. Дмитриев // Первоначальный сплав древесины. Труды ВНИИ лесосплава. – М.: Леспромиздат, 1972. – С. 134–140.

5 Эффективное техническое обслуживание сопрягающих сооружений магистральных каналов: науч. обзор / С. М. Васильев, Ю. Е. Домашенко, Ю. Ф. Снопич, П. В. Калинин, Н. А. Антонова, М. С. Ляшков; ФГБНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2014. – 45 с. – Деп. в ВИНТИ 01.09.14, № 242-В2014.

6 Бабаджанова, Ш. А. Местный размыв за сооружениями на каналах с горизонтальным креплением: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бабаджанова Ш. А. – Ташкент, 1972. – 28 с.

7 Беляшевский, Н. Н. Расчеты нижнего бьефа за водосбросными сооружениями на скальных основаниях / Н. Н. Беляшевский. – Киев: Наукова думка, 1973. – 292 с.

8 Гидротехнические сооружения. Основные положения: СП 58.13330.2012: утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М., 2012. – 38 с.

9 Овчаренко, И. Х. Исследование причин, вызывающих размывы в нижнем бьефе действующих сооружений на Большом Ставропольском канале / И. Х. Овчаренко, Б. П. Автономов, А. И. Тищенко // Научные исследования по гидротехнике в 1971 г. – Л., 1973. – Ч. 2. – С. 106–107.

10 Россинский, К. И. Местный размыв dna в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений / К. И. Россинский // Проблемы регулирования речного стока. – М.: АН СССР, 1956. – Вып. 6. – С. 94–187.

11 Leschenko, S. V. Vertical hydrodynamic loads on the elements of hydrotechnical constructions / S. V. Leschenko, K. N. Makarov // European Researcher. – 2013. – № 5-1(48). – P. 1189–1193.

12 Panov, S. I. Scientific aspects of hydraulic engineering in the extreme north / S. I. Panov, N. F. Krivonogova // Power Technology and Engineering. – 2012. – 45(6). – P. 417–421. – DOI: 10.1007/S10749-012-0287-Z.

13 Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов / С. М. Тарг. – 20-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2010. – 416 с.

14 Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики: учебник / Н. Н. Никитин. – 8-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. – 720 с.

15 Гончаров, В. Н. Динамика русловых потоков / В. Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 373 с.

16 Богомолов, А. И. Гидравлика: учебник / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

17 Щедрин, В. Н. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 5. – С. 33–38.

18 Щедрин, В. Н. Вопросы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений для целей мелиорации / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – № 4. – С. 97–102.

19 Васильев, С. М. Повышение экологической безопасности способов орошения для формирования устойчивых агроландшафтов в аридной зоне: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Васильев Сергей Михайлович. – Волгоград, 2006. – 35 с.

20 Астраханцев, В. И. Разрушение рисбермы и отводящего канала при эксплуатации Иркутской ГЭС / В. И. Астраханцев, В. П. Каленов // Гидротехническое строительство. – 1959. – № 8. – С. 133–157.

21 Натурные наблюдения и исследования сооружений Красноярского гидроузла

в периоды строительства и эксплуатации / В. В. Блинков, А. П. Епифанов, В. А. Кореньков, В. Е. Ляпин, М. Ф. Складнев, А. Г. Соловьева, Э. К. Александровская, Л. М. Гаркун, Ю. А. Григоров, Н. А. Елисеев // Гидротехническое строительство. – 1972. – № 9. – С. 10–15.

22 Гришин, М. М. Гидротехнические сооружения / М. М. Гришин. – М.: Госстройиздат, 1962. – 763 с.

References

1 Levy I.I., 1956. *O mestnom razmyve za sooruzheniyami* [On local erosion below structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 1, pp. 42-56. (In Russian).

2 Vyzgo M.S., 1966. *Ekspluatatsionnye meropriyatiya, prognozy i sposoby umen'sheniya mestnykh razmyvov za gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami* [Operational Measures, Forecasts and Ways to Reduce Local Erosion Behind Hydraulic Structures]. Tashkent, 292 p. (In Russian).

3 Mirtskhulava Ts.E., Muhammedov A.M., 1968. *Sovremennye issledovaniya v oblasti mestnykh razmyvov rusel za gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami* [Contemporary research on local channel scour downstream from hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 12, pp. 22-35. (In Russian).

4 Dmitriev A.F., 1972. *Opreделение глубины воронки размыва в нижнем б'ефе лесоплавных плотин* [Determination of the erosion funnel depth in the downstream of timber rafting dams]. *Pervonachal'nyy splav drevesiny. Trudy VNII lesosplava* [Initial Timber Rafting. Proc. of Research Institute of Timber Rafting]. Moscow, Lespromizdat Publ., pp. 134-140. (In Russian).

5 Vasiliev S.M., Domashenko Yu.E., Snipich Yu.F., Kalinin P.V., Antonova N.A., Lyashkov M.S., 2014. *Effektivnoe tekhnicheskoe obsluzhivanie sopryagayushchikh sooruzheniy magistral'nykh kanalov: nauchnyy obzor* [Effective maintenance of the mating structures of the main canals: scientific review]. Novochoerkassk, 45 p., deposited in VINITI on 09.09.2014, no. 242-V2014. (In Russian).

6 Babadzhanova Sh.A., 1972. *Mestnyy razmyv za sooruzheniyami na kanalakh s gorizontal'nym krepлением. Avtoreferat diss. kand. tech. nauk* [Local erosion behind structures on canals with horizontal fastening. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Tashkent, 28 p. (In Russian).

7 Belyashevsky N.N., 1973. *Raschety nizhnego b'efa za vodosbrosnymi sooruzheniyami na neskalk'nykh osnovaniyakh* [Lower downstream calculations for spillway constructions on non-rocky foundations]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 292 p. (In Russian).

8 *Gidrotekhnicheskies sooruzheniya. Osnovnyye polozeniya: SP 58.13330.2012* [Hydraulic Structures. Basic Statement: SP 58.13330.2012]. Moscow, 2012, 38 p. (In Russian).

9 Ovcharenko I.Kh., Avtonomov B.P., Tishchenko A.I., 1973. *Issledovanie prichin, vyzyvayushchikh razmyvy v nizhnem b'efe deystvuyushchikh sooruzheniy na Bol'shom Stavropol'skom kanale* [Study of the causes of erosion in the lower reach of existing facilities on the Grand Stavropol Canal]. *Nauchnye issledovaniya po gidrotekhnike v 1971 godu* [Scientific Research on Hydraulic Engineering in 1971]. Leningrad, pt. 2, pp. 106-107. (In Russian).

10 Rossinsky K.I., 1956. *Mestnyy razmyv dna v nizhnikh b'efakh krupnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Local erosion of the bottom in the lower pools of large hydraulic structures]. *Problemy regulirovaniya rechnogo stoka* [Problems of Regulation of River Flow]. Moscow, USSR Academy of Sciences, iss. 6, pp. 94-187. (In Russian).

11 Leschenko S.V., Makarov K.N., 2013. Vertical hydrodynamic loads on the elements of hydrotechnical construction. *European Researcher*, no. 5-1(48), pp. 1189-1193.

12 Panov S.I., Krivonogova N.F., 2012. Scientific aspects of hydraulic engineering in the Extreme North. *Power Technology and Engineering*, 45(6), pp. 417-421, DOI: 10.1007/S10749-012-0287-Z.

13 Targ S.M., 2010. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki: uchebnik dlya vuzov* [The

Short Course in Theoretical Mechanics: Textbook for Universities]. 20th ed., Moscow, Higher School, 416 p. (In Russian).

14 Nikitin N.N., 2011. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki: uchebnik* [The Course of Theoretical Mechanics: Textbook]. 8th ed., Saint Petersburg, Lan' Publ., 720 p. (In Russian).

15 Goncharov V.N., 1962. *Dinamika ruslovykh potokov* [Dynamics of Channel Flows]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 373 p. (In Russian).

16 Bogomolov A.I., Mikhailov K.A., 1972. *Gidravlika: uchebnik* [Hydraulics: Textbook]. 2nd ed., rev. and add., Moscow, Stroyizdat Publ., 648 p. (In Russian).

17 Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., 2011. *O problemakh bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo naznacheniya* [Safety problems of hydraulic structures designed for land reclamation]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 5, pp. 33-38. (In Russian).

18 Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., 2010. *Voprosy obespecheniya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy dlya tseley melioratsii* [Issues of Security of hydraulic engineering structures for land reclamation]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* [Bull. of Agricultural Science of the Don], no. 4, pp. 97-102. (In Russian).

19 Vasiliev S.M., 2006. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti sposobov orosheniya dlya formirovaniya ustoychivyykh agrolandshaftov v aridnoy zone. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Improving the environmental safety of irrigation methods for the formation of sustainable agrolandscapes in the arid zone. Abstract of doc. tech. sci. diss.]. Volgograd, 35 p. (In Russian).

20 Astrakhantsev V.I., Kalenov V.P., 1959. *Razrusheniye risbermy i otvodyashchego kanala pri ekspluatatsii Irkutskoy GES* [Deterioration of apron and tailrace canal portions of the Irkutsk hydroelectric plant]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 8, pp. 133-157. (In Russian).

21 Blinkov V.V., Epifanov A.P., Korenkov V.A., Lyapin V.E., Skladnev M.F., Solovieva A.G., Alexandrovskaya E.K., Garkun L.M., Grigorov Yu.A., Eliseev N.A., 1972. *Naturnye nablyudeniya i issledovaniya sooruzheniy Krasnoyarskogo gidrouzla v periody stroitel'stva i ekspluatatsii* [Full-scale observations and investigations of structures of the Krasnoyarsk hydro development during construction and operation.]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 9, pp. 10-15. (In Russian).

22 Grishin M.M., 1962. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydraulic Structures]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 763 p. (In Russian).

Тищенко Александр Иванович

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru

Tishchenko Aleksandr Ivanovich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru